

Optymalna lokalizacja źródeł generacji rozproszonej w terenowej sieci średniego napięcia

Streszczenie W artykule omawia się metodę lokalizacji źródeł generacji rozproszonej w terenowej sieci SN. Przedstawia się rolę generacji rozproszonej w regulacji napięć w sieci terenowej oraz model sieci SN przydatny w analizach technicznych. Omawia się kryteria optymalnej lokalizacji źródeł rozproszonych w sieci dystrybucyjnej oraz dokonuje się ich analizy. Przeprowadza się analizę dopuszczalnych wariantów lokalizacji źródeł rozproszonych w sieci terenowej SN przy zastosowaniu trzech kryteriów.

Abstract: The paper discusses a method of location of distributed generation sources in a MV rural network. The role of distributed generation in the voltage regulation in the rural network and a model of the MV network, useful to technical analysis, are presented. The criteria for the optimal location of distributed generation sources in the distribution network are discussed and their analysis is made. The analysis of permitted location variations of distributed generation sources in the MV rural network is made with the use of three criteria (**Optimal location of distributed generation sources in a medium voltage rural network**).

Słowa kluczowe: generacja rozproszona, lokalizacja źródeł, sieć SN.

Keywords: distributed generation, location of sources, MV network.

Wstęp

Podmioty należące do III-V grupy przyłączeniowej są to odbiorcy, których urządzenia i instalacje bezpośrednio przyłączone zostały do sieci dystrybucyjnej średniego lub niskiego napięcia. Najczęściej sieci dystrybucyjne pracują w układach jednostronnie zasilanych (rzadziej w układach zamkniętych), w których największe odchylenia napięć występują w końcowych węzłach sieci. Stale zwiększające się potrzeby odbiorców wpływające na wydłużanie ciągów liniowych oraz zwiększone ich obciążenia mogą przyczynić się do przekroczenia dopuszczalnych wartości odchyżeń napięcia przekraczając granice określone w systemowym rozporządzeniu [4]. Istnieje kilka sposobów, które mają na celu zapobiec takiej sytuacji. Wśród popularnych rozwiązań można wymienić: wykorzystanie możliwości regulacyjnych transformatorów zasilających, instalowanie transformatorów dodatkowych lub prowadzenie odpowiedniej gospodarki mocą bierną [1, 2, 7]. Poza tymi tradycyjnymi metodami sieciowymi warto wskazać możliwości związane z nowymi formami rozwoju elektroenergetyki. W tej grupie alternatywą dla rozwiązań sieciowych jest rozwój generacji rozproszonej.

Generacja rozproszona jest pojęciem szerokim i nie posiada jednej powszechnie stosowanej definicji. Niemniej jednak, bez wątpliwości można jej przypisać pewne cechy charakterystyczne [3]:

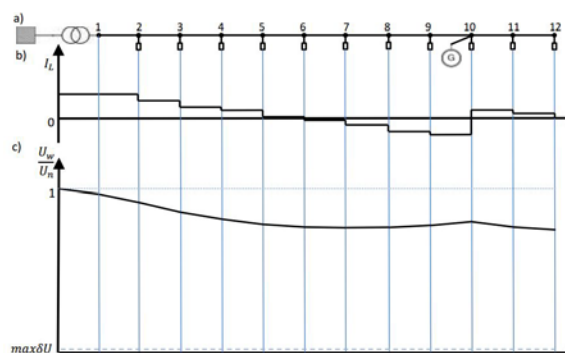
- maksymalna moc źródła nie przekracza wartości kilkudziesięciu MW,
- źródła są przyłączone do sieci dystrybucyjnej,
- źródła rozproszone nie podlegają centralnemu planowaniu i sterowaniu.

Przyłączanie źródła rozproszonego do sieci

Źródła rozproszone można przyłączyć do szyn zbiorczych w stacji zasilającej sieć lub do węzła odbiorczego położonego w głębi sieci niskiego lub średniego napięcia. Przyłączenie źródła zmienia warunki napięciowe panujące w danym układzie sieci. Celem zaprezentowania wpływu źródła rozproszonego na odchylenie napięcia w sieci rozpatrzono przykład sieci jednostronnie zasilanej (rys. 1).

Włączenie źródła rozproszonego do węzła sieci, który nie jest węzłem skrajnym, np. węzeł numer 10 (rys. 1), powoduje, że w niektórych odcinkach linii zmieniają się spadki napięcia (względem sieci bez źródła) - odcinki linii

od węzła nr 1 do węzła nr 10, a w niektórych pozostają bez zmian - odcinki linii od węzła nr 10 do węzła nr 12. Odchylenie napięcia w i -tym węzle jest równe sumie spadków napięć na elementach sieci zlokalizowanych między węzłami nr 0 oraz i . Zmiana spadku napięcia na jednym odcinku linii powoduje zmianę odchylenia napięcia we wszystkich węzłach położonych za tym odcinkiem linii.



Rys. 1. Źródło włączone do węzła nr 10 a) schemat sieci, b) obciążenie, c) względna zmiana wartości napięcia [7]

Podsumowując przedstawione rozważania można sformułować zadanie polegające na wyznaczeniu węzła sieci, do którego należy włączyć źródło rozproszone, aby uzyskać najbardziej korzystne warunki napięciowe. Miejsce włączenia źródła generacji rozproszonej do sieci jest kwestią indywidualną, zależną od budowy sieci oraz mocy układu. Poniżej przedstawiono propozycje metod optymalizacji miejsca przyłączenia źródła rozproszonego do sieci średniego napięcia [7].

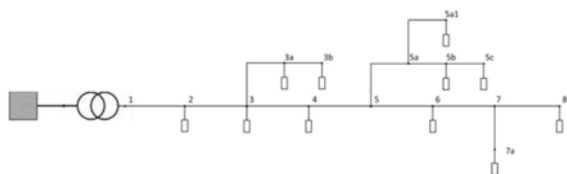
Model sieci terenowej SN

Terenowe sieci średniego napięcia zwykle są realizowane w układzie sieci jednostronnie zasilanej, składającej się z kilkudziesięciu węzłów odbiorczych [5]. Rzadko spotyka się sieć, która miałaby kilkanaście węzłów odbiorczych. Jednak z uwagi na złożoność obliczeniową, w celu ilustracji, posłużono się modelem kilkunastowęzłowej promieniowej sieci średniego napięcia przyjmując szereg uproszczeń. Sieć ta składa się z transformatora zasilającego 110/15 kV o mocy znamionowej 10, MVA oraz jedenastu węzłów odbiorczych. Wszystkie odcinki linii w

rozpatrywanej sieci zbudowane są z przewodów typu AFL-6 o przekroju 90 mm².

Na rysunku 2 przedstawiono strukturę badanej sieci. Na potrzeby analizy założono także jedną, wybraną sytuację rozpiętą. Sieć modelowa posłużyła do przedstawienia wpływu mocy generowanej przez źródło rozproszone na wartość odchylenia napięcia w węzłach. Odchylenie napięcia jest definiowane jako różnica rzeczywistej wartości napięcia w danym węzle sieci i napięcia znamionowego.

Sieć modelowa przedstawiona na rysunku 2 jest siecią zasilaną jednostronnie, co wyznacza charakterystyczny dla tego układu rozkład napięć węzłowych. Największe spadki napięć powstają na najbardziej obciążonych odcinkach linii położonych bezpośrednio za transformatorem zasilającym. Wraz z oddalaniem się od punktu zasilania sieci maleją wartości spadków napięć na odcinkach linii z uwagi na zmniejszające się obciążenia gałęzi.



Rys. 2. Schemat modelowej sieci średniego napięcia

Kryterium napięciowe optymalnej lokalizacji źródła rozproszonego w sieci dystrybucyjnej

Aby podwyższyć poziom napięcia w ostatnich węzłach sieci najprostszym rozwiązaniem byłoby przyłączenie źródeł rozproszonych do tych węzłów. Powstałaby sieć wielostronnie zasilana, w której punkt spływu mocy, a tym samym miejsce wystąpienia największego odchylenia napięcia, przesunąłby się w głąb sieci. Jednak przyłączenie źródła generacji rozproszonej do węzła sieci, w której występują największe odchylenia napięcia nie jest tożsame z uzyskaniem najlepszych warunków napięciowych w układzie. Jednak pojęcie najlepszych warunków napięciowych w układzie można definiować przykładowo na dwa sposoby. Pierwszym z nich jest minimum funkcji najmniejszej wartości średniej wszystkich napięć węzłowych badanej sieci, natomiast drugim minimum funkcji maksymalnego odchylenia napięcia w badanej sieci.

Drugą wielkością determinującą najkorzystniejszą lokalizację źródła generacji rozproszonej w sieci jest średnie odchylenie napięcia wyznaczone ze wszystkich węzłów badanej sieci. Dla obu wielkości kryterialnych proces wyznaczania najkorzystniejszej lokalizacji źródła generacji rozproszonej jest analogiczny. Proces ten opisano algorytmem [7]. Pierwszym krokiem tego algorytmu jest właściwa numeracja wszystkich węzłów sieci. Następnie z uwagi na fakt, że wartość mocy generowanej wpływa na wskazanie optymalnej lokalizacji źródła, należy przyjąć zakres mocy generowanej przez przyłączane źródło. Źródło o założonej minimalnej mocy generowanej należy przyłączyć do *i*-tego węzła, gdzie *i* jest kolejnym numerem węzła (*i*=1, 2...*n*). Następnie należy rozwiązać zadanie rozpiętowe, w wyniku którego otrzymuje się rozkład napięć węzłowych. Z otrzymanego rozkładu wyznacza się maksymalną i/lub średnią wartość odchylenia napięcia. Wartości te są zapamiętywane, po czym sprawdzany jest warunek: czy węzeł, do którego przyłączono źródło generacji rozproszonej jest końcowym węzłem sieci. Jeżeli warunek nie jest spełniony, to źródło generacji rozproszonej jest przyłączane do kolejnego węzła sieci, a algorytm jest kontynuowany od drugiego kroku. Jeżeli natomiast powyższy warunek jest spełniony można przejść do

następnego kroku algorytmu, w którym ze zbioru uzyskanych średnich wartości odchylenia napięcia $\overline{\delta U_i}$ i/lub maksymalnych odchylenia napięcia $\max \delta U_i$ wyznaczone są te o najniższej wartości. Węzeł sieci z przyłączonym źródłem, dla którego uzyskano najniższą wartość wielkości kryterialnej, jest traktowany jako optymalny dla lokalizacji źródła z uwagi na rozkład napięć w sieci.

W zależności od specyfiki i rodzaju źródła generacji rozproszonej, a tym samym od spodziewanych wartości mocy generowanych oraz częstości ich występowania, jako optymalne miejsce przyłączenia źródła wybiera się ten węzeł, który najczęściej był wskazywany, jako optymalna lokalizacja lub węzeł wyznaczony jako optymalna lokalizacja dla spodziewanej najczęściej występującej mocy generowanej źródła. Przykładem tej drugiej sytuacji może być instalacja elektrowni wiatrowej w sieci elektroenergetycznej, w której generowana moc sporadycznie może osiągać skrajne wartości, lecz przez większość czasu pracuje przy wietrze charakterystycznym dla danego położenia geograficznego i warunków terenowych.

W tabeli 1 przedstawiono węzły wskazane jako optymalne lokalizacje źródła w modelowej sieci, w zależności od mocy generowanej tego źródła oraz od zastosowanego kryterium. Na podstawie uzyskanych wyników nasuwają się dwa podstawowe wnioski. Po pierwsze - w zależności od zastosowanego kryterium napięciowego można otrzymać różne wskazania optymalnej lokalizacji. Natomiast drugi wniosek jest taki, że najlepsza lokalizacja źródła zależy od poziomu jego mocy generowanej.

Tabela 1. Zestawienie najbardziej korzystnych lokalizacji źródła w zależności od mocy generowanej oraz od przyjętego kryterium

Założona moc źródła	Optymalna lokalizacja wg kryterium maksymalnego odchylenia napięcia	Optymalna lokalizacja wg kryterium średniej wartości odchylenia napięcia
MVA		
0,5	8	8
1	7	5c
1,5	6	5b
2	6	5b
3	6	5b
4	6	5a
5	6	5a
6	5	5a
7	5	5a
8	5	5a

W przedstawionej analizie określono lokalizację źródła rozproszonego w sieci na podstawie założonej, jednej sytuacji rozpiętowej. W rzeczywistości poziom napięcia w sieci jest zjawiskiem bardzo złożonym, zależnym od wielu czynników zmiennych w czasie. Na wartość napięcia wpływa między innymi stopień obciążenia transformatorów odbiorczych, współczynnik mocy odbiorców, poziom mocy generowanej przez źródło rozproszone oraz spadek napięcia w sieci przesyłowej [1]. Każdy z tych czynników wpływa na wynik wyboru optymalnego węzła przyłączenia źródła.

Kryterium mocy znamionowej transformatorów odbiorczych

Metoda wyznaczania optymalnej lokalizacji źródła rozproszonego w sieci SN, wykorzystująca takie wartości kryterialne jak maksymalne lub średnie odchylenia napięcia, wymaga znajomości m.in. obciążeń danej sieci. Również dla określenia optymalnej lokalizacji źródła rozproszonego konieczna jest znajomość wszystkich parametrów sieci, jej

struktury oraz charakterystyk pracy źródła. Jest to metoda bardzo pracochłonna i czasochłonna oraz wymagająca stosowania skomplikowanych algorytmów obliczeniowych.

Dużo prostszym rozwiązaniem jest wybór miejsca przyłączenia źródła małej mocy według wartości charakterystycznych i ustalonych dla danej sieci. Dla takich należą moce znamionowe transformatorów odbiorczych oraz ich rozmieszczenie. Stosując te wielkości można zaproponować metodę lokalizacji źródła wprawdzie o wiele mniej dokładną niż metody wykorzystujące maksymalne lub średnie wartości napięć węzłowych, ale za to prostą i skuteczną.

Prowadząc badania w tym kierunku zaproponowano metodę opartą na kryterium mocy znamionowej transformatorów. W tym przypadku wyznacza się stosunek sumy mocy znamionowych transformatorów położonych za węzłem, do którego można przyłączyć źródło rozproszone (włącznie z transformatorem przyłączonym do węzła, do którego przyłączane jest źródło), do sumy mocy znamionowych wszystkich transformatorów odbiorczych przyłączonych do badanej gałęzi sieci. Wskaźnik kryterium mocy znamionowej transformatorów K_S określa zależność:

$$(1) \quad K_S = \frac{\sum_{i=a}^n S_{Ni}}{\sum_{i=1}^n S_{Ni}}$$

gdzie: n - liczba transformatorów odbiorczych (węzłów odbiorczych) w badanej gałęzi sieci, a zarazem numer ostatniego transformatora, a - węzeł, do którego przyłączono źródło małej mocy, S_{Ni} - moc znamionowa i -tego transformatora odbiorczego.

Poszczególne węzły odbiorcze sieci są uważane za korzystne dla lokalizacji źródła generacji rozproszonej, jeżeli wskaźnik kryterium spełnia warunek [7]:

$$(2) \quad K_S \in (0,25;0,5)$$

Na podstawie opracowanego kryterium mocy znamionowej transformatorów odbiorczych wyznaczono potencjalne lokalizacje źródła generacji rozproszonej w sieci modelowej. W tabeli 2 zestawiono wartości wskaźnika kryterium mocy znamionowej transformatorów obliczone dla wszystkich węzłów odbiorczych modelowej sieci.

Tabela 2 Wyznaczone wartości wskaźnika K_S

Numer węzła	1	2	3	4	5	6	7
K_S	1	1	0,93	0,68	0,59	0,27	0,2

cd. tabeli 2

Numer węzła	8	3a	3b	5a	5b	5c	5a1	7a
K_S	0,11	0,18	0,07	0,31	0,22	0,2	0,09	0,09

Na podstawie przedstawionych wyników widać, że kryterium mocy znamionowej transformatorów spełniają jedynie węzeł nr 6 oraz nr 5a. Jednak widać również, że węzły nr 5b oraz nr 5 jedynie nieznacznie odbiegają od wyznaczonych zalecanych wartości wskaźnika K_S . Pomijając przypadek, dla którego założono bardzo małe mocne generowane źródła, węzły wskazane jako optymalne lokalizacje źródła w pełnej analizie kryteriów napięciowych w znacznym stopniu pokrywają się z węzłami wyznaczonymi za pomocą uproszczonego kryterium mocy znamionowej transformatorów.

Maksymalna moc źródła generacji rozproszonej

Kryterium mocy znamionowej transformatorów jest znacznie prostsze i mniej pracochłonne obliczeniowo w zastosowaniu. Zaleta ta może zachęcić do praktycznego wykorzystania powyższego kryterium. Jakkolwiek metoda ta bazuje wyłącznie na znajomości wartości mocy znamionowych transformatorów odbiorczych oraz układu sieci, to brakuje jeszcze odpowiedzi na pytanie: jaka powinna być maksymalna moc generowana przez źródło? Propozycją rozwiązania tego problemu jest zastosowanie dodatkowego opracowanego kryterium, które oparte jest na dopuszczalnej obciążalności gałęzi. Kryterium to stanowi, że wartość wskaźnika dopuszczalnej obciążalności (ozn. W) musi być mniejsza lub równa jedności. Wskaźnik dopuszczalnej obciążalności jest definiowany jako stosunek maksymalnej mocy generowanej przez źródło S_{Gmax} do maksymalnej obciążalności sieci S_{Omax} , wynikającej z prądu dopuszczalnego długotrwanie odcinków sieci łączących węzeł, do którego planowane jest przyłączenie źródła z głównym punktem zasilającym.

W praktyce sieć elektroenergetyczna jest zbudowana w takich sposób, że odcinki linii o największym przekroju znajdują się zaraz z a transformatorem, na magistrali głównej. Wraz z "oddalaniem się" od GPZ stosuje się odcinki linii o mniejszych przekrojach przewodów, a co za tym idzie o mniejszej dopuszczalnej obciążalności długotrwałej. Dlatego zakładając, że odcinek ciągu mający najmniejszy przekrój (spośród odcinków łączących węzeł z przyłączonym źródłem z głównym punktem zasilającym) znajduje się bezpośrednio przed wybranym węzłem sieci, patrząc od strony GPZ, wskaźnik W dla i -tego węzła można zapisać jako:

$$(3) \quad W_i = \frac{S_{Gmax}}{S_{Omax(i-1;i)}}$$

gdzie: W_i - wskaźnik W dla i -tego węzła, S_{Gmax} - maksymalna moc generowana przez źródło, $S_{Omax(i-1;i)}$ - obciążalność dopuszczalna długotrwanie odcinka linii łączącego węzeł $i-1$ z węzłem i -tym.

Uwzględniając powyższe założenia, źródło rozproszone można przyłączyć do i -tego węzła, jeżeli spełnione jest kryterium określone poniższą zależnością:

$$(4) \quad W_i \leq 1$$

Kryterium dopuszczalnej obciążalności ma dwa zasadnicze cele. Pierwszym i podstawowym celem jest ocena maksymalnej mocy, z jaką może pracować źródło rozproszone w danej sieci. Natomiast drugim celem - przy zadanej mocy - jest redukcja liczby potencjalnych lokalizacji źródła rozproszonego.

Kryteria oceny możliwości przyłączenia źródeł wytwórczych do sieci średniego napięcia (SN)

A. Kryterium zapasu mocy w stacji 110 kV/SN

Kryterium to służy do określania poziomu mocy wytwórczej możliwej do przyłączenia w danej stacji 110/SN (bezpośrednio lub poprzez istniejącą sieć SN), przy uwzględnieniu:

- mocy transformatorów 110/SN,
- minimalnym obciążeniu poszczególnych sekcji,
- mocy zainstalowanej źródeł przyłączonych lub planowanych do przyłączenia do sieci SN współpracującej z daną stacją 110/SN.

Kryterium to jest opisane zależnością (5).

$$(5) \quad S_{tr} - |\sum S_{Gn} - S_{obc}| > 0$$

gdzie: S_{tr} – moc znamionowa transformatora 110/SN [MVA], $\sum S_{Gn}$ – suma mocy zainstalowanych źródeł w sieci S_n [MVA], S_{obc} – minimalne obciążenia [MVA].

B. Kryterium stabilności lokalnej.

Kryterium to służy do stwierdzenia czy stan systemu elektroenergetycznego w punkcie przyłączenia (PCC) pozwala na przyłączenie źródła w szczególności o niestabilnej i nieprzewidywalnej generacji.

Ponieważ parametrem opisującym jakość systemu jest moc zwarciova, w związku z tym kryterium to uwzględni relacje między:

- określoną mocą zwarciową w PCC,
- mocą znamionową przyłączonego źródła.

Kryterium to jest opisane zależnością:

$$(6) \quad S_{kPCC} > 20 * \sum S_n$$

gdzie: S_{kPCC} – moc zwarciova w PCC [MVA], $\sum S_n$ – suma mocy znamionowych poszczególnych źródeł [MVA].

C. Kryterium dynamicznej zmiany napięcia.

Kryterium to służy do stwierdzenia czy poziom wahań napięcia związany jest z procesami łączeniowymi pozwala na przyłączenie źródła o niestabilnej i nieprzewidywalnej generacji, przy uwzględnieniu:

- określonej mocy zwarciowej w PCC,
- mocy znamionowej przyłączonego źródła,
- parametrów technicznych danego typu turbiny.

Kryterium to jest opisane zależnością:

$$(7) \quad d = k_u * \frac{S_{ng}}{S_{kPCC}} < 0,03$$

gdzie: S_{kPCC} - moc zwarciova w PCC [MVA], S_{ng} - największa moc znamionowa pojedynczej turbiny [MVA], k_u - wskaźnik zmiany napięcia.

Podsumowanie

Obecne możliwości technologiczne jak i świadomość użytkowników sieci sprzyjają instalacji źródeł rozproszonych w sieciach dystrybucyjnych. Racjonalne podejście do strategii rozwoju sieci pozwala na wykorzystanie tych źródeł do poprawy funkcjonowania sieci. W artykule skupiono się na wybranych aspektach wykorzystania źródeł rozproszonych do kształtowania poziomów napięć w sieci dystrybucyjnej. Przyjmując kryterium napięciowe można wyznaczyć lokalizacje pożądane z uwagi na rozkład napięć w ciągach liniowych. Wyniki można osiągnąć na bazie złożonych, o dużym nakładzie pracy, analiz sieciowych. Można również stosować kryteria proste, które dają

wystarczające przybliżenie odpowiednich lokalizacji źródeł w sieci. W tym celu opracowano i przedstawiono kryterium mocy znamionowej transformatorów.

Weryfikując poprawność pracy sieci należy również sprawdzić czy moc generowana przez źródło zainstalowane w głębi sieci dystrybucyjnej nie przekroczy dopuszczalnych obciążeń gałęzi tej sieci. Również i w tym zakresie przedstawiono propozycję prostych rozwiązań, oceniających dopuszczalny poziom mocy generowanej w sieci.

Przedstawione w artykule różne kryteria wyznaczania dopuszczalnych wariantów lokalizacji źródeł generacji rozproszonej są bardzo pomocne przy określaniu optymalnej lokalizacji tych źródeł w sieci terenowej średniego napięcia.

Autor: dr hab. inż. Jerzy Marzecki, prof. PW, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: Jerzy.Marzecki@ien.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Cano E. B., Utilizing fuzzy optimization for distributed generation allocation. *TENCON 2007-2007 IEEE Region 10 Conference*, November, 2007, 1-4
- [2] Kot A., Szpyra W., Optymalna regulacja napięcia w sieciach rozdzielczych średniego napięcia. *Acta Energetica*, 2009, nr 2
- [3] Przygodzki M., Modelowanie rozwoju sieci elektroenergetycznej współpracującej ze źródłami rozproszonymi, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2011
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz. U. Nr 93, poz. 623 (z późniejszymi zmianami)
- [5] Harrison G. P., Ochoa L.F., Dent Ch. J., Network distributed generation analysis using OPF with voltage step constraints, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, February, 2010, 296-304
- [6] Shukla T. N., Singh S. P., Nalk K. B., Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 3., 2010, 94-106.
- [7] Webs E., Przygodzki M., Lokalizacja źródeł generacji rozproszonej w sieciach średniego napięcia, *Energetyka*, 2014, nr 2
- [8] Marzecki J., Terenowe sieci elektroenergetyczne, *Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji*, Radom-Warszawa, 2007
- [9] Yatsalo B., Diclenko V., Gritsyuk S., Sullivan T. A Framework for Multi-Criteria Decision Analysis, *International Journal of Computational Intelligence Systems.*, 2015, nr 8, 467-489